

DOI: 10.25558/VOSTNII.2020.56.52.004

УДК 622.023.23

© Н.В. Черданцев, 2020

Н.В. ЧЕРДАНЦЕВ

д-р техн. наук,
главный научный сотрудник
ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово
e-mail: nvch2014@yandex.ru



ПОСТРОЕНИЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О НАПРЯЖЁННОМ СОСТОЯНИИ ОТРАБАТЫВАЕМОГО УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ОКОЛО ДВУХ ВЫРАБОТОК

Поле напряжений в углеродном массиве, вмещающем пластовые выработки и выработанное пространство, построено в результате решения упругопластической задачи, в которой областью пластичности являются предельно напряжённые зоны краевых частей пласта, а также область слоя обрушенных пород позади очистной выработки. В краевых частях это поле определено в ходе численного решения трёх краевых задач предельного состояния пласта и слоя обрушенных пород. Критериями наступления предельного состояния являются общий критерий Кулона–Мора по угольному пласту и слою обрушенных пород, а также специальный критерий предельного состояния по их контактам с массивом.

Путём замены предельно напряжённых зон напряжениями, действующими по контакту пласта с массивом, упругопластическая задача сводится ко второй внешней краевой задаче теории упругости, которая решается методом граничных интегральных уравнений.

Построены эпюры опорного давления в краевых частях пласта и слоя обрушенных пород. Из анализа результатов проведённых исследований установлено, что существенные изменения угла внутреннего трения обрушенных пород мало влияют на параметры опорного давления в окрестности очистной и подготовительной выработок.

Ключевые слова: МАССИВ ГОРНЫХ ПОРОД, УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, ПРЕДЕЛ ПРОЧНОСТИ ПЛАСТА, КОЭФФИЦИЕНТ СЦЕПЛЕНИЯ, УГОЛ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ, ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫЕ ЗОНЫ, КРИТЕРИИ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ КУЛОНА–МОРА, ГОРНАЯ ВЫРАБОТКА.

1. ВВЕДЕНИЕ

Добыча угля из очистного забоя на любой угольной шахте занимает важнейшее место во всём комплексе мероприятий, обеспечивающих ритмичную и стабильную работу этой шахты. Этому виду работ уделяется особое внимание, как в плане рациональной организации труда, технической оснащённости очистного забоя, прогноза газодинамических явлений, так и обеспечения безопасности горных работ [1–7].

В этой связи разрабатываемые технологические схемы ведения очистных горных работ должны быть надёжно обоснованы геомеханическими расчётами. Эти расчёты следует проводить в рамках физико-математических моделей, основанных на фундаментальных методах деформируемого твёрдого тела, в которых физико-механические свойства изучаемого объекта учитываются наиболее полно и, следовательно, результаты исследований являются наиболее достоверными.

Обычно в моделях геомеханического со-

стояния углепородного массива и сам массив, и угольные пласты в естественных условиях (до ведения горных работ) находятся в упругом состоянии. Однако при проведении пластовой выработки в неупругое состояние переходят сначала участки пласта, расположенные в его краевых зонах (в бортах выработки), в то время как боковые породы массива, считаются достаточно прочными и могут, по-прежнему, деформироваться упруго [3–5, 8–12].

Одной из первых работ, посвящённых состоянию углепородного массива, вмещающего угольный пласт и проводимую по нему очистную выработку, является работа С.А. Христиановича и Г.И. Баренблата [12]. В ней авторы использовали классические методы теории упругости и пластичности. Они полагали, что угольный пласт переходит в пластическое состояние при удовлетворении критериев Треска–Сен-Венана и Губера–Мизеса, а диаграмма условных напряжений материала является диаграммой Прандтля (без учёта его упрочнения) [13]. В этой работе полагается, что по мере выемки пласта горные породы его кровли и почвы по мере отработки не разрушаются, а плавно смещаются друг к другу, смыкаясь между собой на достаточно большом расстоянии от края пласта. Распределение напряжений в пласте следует из классической задачи Прандтля о сжатии пластичного материала между двумя абсолютно жёсткими и шероховатыми плитами. Такая постановка несколько упрощена и не совсем соответствует реальному поведению массива при отработке пласта очистной выработкой. В реальных условиях при выемке угля породы кровли обязательно обрушаются, каким бы значительным ни было выработанное пространство, а плавное смыкание возможно лишь при закладке этого пространства [3, 4].

В работе [4] кривая опорного давления представляется полуэмпирической зависимостью в виде экспоненциальной кривой, которая принимается по аналогии с аналитическим выражением напряжений в сыпучей среде, а также многочисленными экспериментальными исследованиями на ряде уголь-

ных месторождений. Область обрушенной за очистным забоем горной массы в расчётах никак не учитывается.

В работе [8] кривая опорного давления строится в ходе решения так называемой основной задачи. Ею является задача о пластовой щелевой выработке, расположенной в упругом изотропном массиве до обрушения пород кровли. Напряжения в предельно напряжённой краевой зоне пласта изменяются линейно по аналогии с задачей о деформировании пластичного слоя между двумя жёсткими плитами, а некоторые коэффициенты, входящие в выражения для напряжений, определяются экспериментально путём испытания кубиков угля, вырезанных из забоя выработки. По сути дела, кривая опорного давления строится не из решения упругопластической задачи, а путём простого наложения напряжений в предельно напряжённой зоне и напряжений в нём, полученных из решения задачи теории упругой о массиве со щелевой выработкой.

В данной статье приведены некоторые результаты решения упругопластической задачи. В ней полагается, что краевые части пласта в окрестности очистной и подготовительной выработок, а также часть слоя обрушенных пород, примыкающих к очистной выработке, находятся в предельно напряжённом состоянии. Результатами решения являются параметры опорного давления: кривые опорного давления, коэффициенты концентрации напряжений k_{σ} , равные максимальным вертикальным напряжениям σ_z в зонах опорного давления, отнесённым к гравитационному давлению налегающих пород, и размеры предельно напряжённых зон в окрестности выработок L_o, L_{ov}, L_m .

2. ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Задача формулируется следующим образом (рис. 1). В массиве горных пород, нагруженном гравитационным давлением сверху и снизу γH (γ — средневзвешенный объёмный вес налегающих пород), а с боков — $\lambda \gamma H$ (λ — коэффициент бокового давления), на

глубине H по угольному пласту 1 на всю его мощность t движется очистная выработка 2 прямоугольного сечения размерами $b_{ov} \times h$ по направлению к подготовительной выработке 3. Ею может быть уклон, бремсберг или заранее пройденная демонтажная камера. Размеры выработки $b_{nv} \times h$. Между выработками расположен целик размером c . Система координат yo_z расположена в центре тяжести поперечного сечения очистной выработки. Длина выработок вдоль трасс (вдоль оси x) значительно превосходят их размеры в плоскости yo_z , поэтому породы в их окрестности находятся в условиях плоской деформации. Характеристики прочности угольного пласта: σ_0 — предел прочности на одноосное сжатие, K — коэффициент сцепления, ρ — угол внутреннего трения значительно меньше, чем характеристики прочности пород вмещающего массива, но больше, чем характеристики на контакте пласта с остальным массивом (σ'_0 — предел прочности на сжатие, K' — коэффициент сцепления, ρ' — угол внутреннего трения).

Впереди очистной выработки краевая часть угольного пласта 4 шириной L_{ov} находится в предельно напряжённом состоянии. Аналогичные зоны размером L_{nv} возникают и в бортах подготовительной выработки 5. Позади очистной выработки образуется слой массива обрушившейся сверху породы после выемки угля. Он представляет собой сыпучую среду, но часть его 6 находится в предельно

напряжённом состоянии, а часть 7, расположенная вдали от выработки левее линии KP , переходит в упругое состояние. Характеристики прочности слоя: предел прочности σ_s и коэффициент сцепления K_s , как и характеристики прочности σ'_s, K'_s , на его контакте с массивом, равны нулю, т. е. породы в обрушенном слое полностью потеряли связность. Угол внутреннего трения ρ_s равен углу внутреннего трения ρ'_s по его контакту с массивом.

Следует отметить, что к характеристикам прочности горной породы относятся коэффициент сцепления K (предел прочности на одноосное сжатие σ_0), и угол внутреннего трения ρ . Величина K сильно зависит от типа горной породы и для каждого отдельного случая принимает своё конкретное значение.

Коэффициент сцепления по контакту слоёв или в общем случае по поверхностям ослаблений, как правило, ниже, чем по пласту или монолитной породе. Для большинства типов поверхностей ослабления, к которым относятся и тектонические нарушения, K меняется от нуля до 0,2 МПа [4].

Угол ρ более стабильная характеристика. Так, например, для большинства типов песчаных пород (монолитных или ослабленных) угол ρ изменяется в пределах $30^\circ - 39^\circ$, а в песчано-глинистых породах и угольных пластах ρ колеблется в интервале $20^\circ - 25^\circ$. По контактам слоёв $\rho = 9^\circ - 20^\circ$ [4].

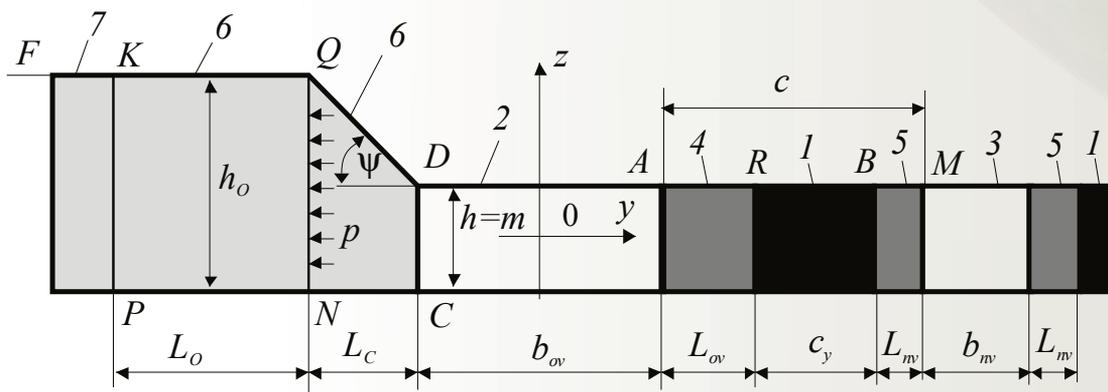


Рис. 1. Расчётная схема массива с очистной и подготовительной выработками

Обрушение пород начинается от кровли выработки и распространяется вглубь массива под углом ψ к горизонту (рис. 1). В зависимости от горно-геологических условий этот угол изменяется в пределах от 40° до 50° [3, 4]. Максимальная мощность слоя обрушенных пород h_o определяется условиями подбучивания, при которых верхние слои получают опору на обрушенные породы, препятствующие их дальнейшему значительному смещению. Мощность слоя зависит от физико-механических свойств пород кровли пласта и вычисляется по формуле [3, 4]

$$h_o = \frac{m}{k_p - 1}, \quad (1)$$

где k_p — коэффициент разрыхления разрушенных пород. Он принимается в пределах 1,1–1,3. Причём, у более прочных пород коэффициент разрыхления выше.

Часть предельно напряжённого слоя $CDQKN$ состоит из двух участков: трапециевидного участка $CDQN$ и прямоугольного $QKPN$. Из рис. 1 следует, что длина трапециевидного участка равна $L_c = (h_o - h) \cdot \text{ctg}\psi$, длина же прямоугольного участка L_o изначально неизвестна и находится из решения упруго-пластической задачи. Поскольку длина трапециевидной части значительно меньше прямоугольной, то в расчётах учитывается только прямоугольная часть этой зоны. Влияние же трапециевидной части на прямоугольную передаётся по стороне QN в виде нагрузки отпора p , создаваемой весом сыпучего материала в обрушенном породном слое $p_b = \gamma_c h_o$ (γ_c — объёмный вес обрушенной породы).

Известно, что в сыпучей несвязной среде горизонтальная нагрузка p определяется следующим образом [4]:

$$p = \xi \cdot p_b = \xi \cdot \gamma_c h_o, \quad (2)$$

В формуле (2) ξ — коэффициент бокового давления, определяется следующим образом [4]:

$$\xi = \frac{1 - \sin \rho_s}{1 + \sin \rho_s},$$

γ_c — объёмный вес обрушенной породы.

2.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЁННОМ СОСТОЯНИИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

Особенность задачи о напряжённом состоянии массива с пластовой выработкой состоит в том, что прочность окружающих пород, как правило, существенно выше прочности пласта, по которому пройдена выработка. Поэтому если горные породы деформируются ещё упруго, то краевые части пласта уже находятся в предельном состоянии.

Предельно напряжённые зоны пласта начинают развиваться с его обнажения в бортах выработки при достижении вертикальным главным напряжением σ_1 значения σ_0 (главное напряжение σ_3 на обнажении равно нулю). Далее зона неупругих деформаций распространяется вглубь пласта, и в этой зоне он деформируется не только по направлению его мощности, но и в плоскости контактов между пластом и окружающими породами, где происходит его проскальзывание. Поэтому в нём одновременно реализуются два предельных состояния равновесия: общее или обыкновенное (состояние самого пласта) и специальное (состояние по контакту пласта с окружающим массивом) [4, 14, 15].

В этой связи в строгой постановке задачи необходимо использовать два критерия перехода его в предельное состояние: общий и специальный критерии Кулона–Мора. Эти критерии чаще всего применяются в виде прямолинейных огибающих кругов предельных состояний и по пласту, и по поверхностям ослаблений (по контакту пласта с массивом) [4, 14, 15]. Совместно с дифференциальными уравнениями равновесия они образуют систему нелинейных уравнений относительно приведённого напряжения σ и угла ϕ между главным напряжением σ_1 и осью абсцисс y (рис. 2) [14]. Эта система сводится к дифференциальному уравнению гиперболического типа. Ин-

тегрирование таких уравнений производится методом характеристик (характеристических линий), на которых их вид значительно упрощается. Характеристические линии совпадают с линиями скольжения материала, и они представляют сетку из двух систем, пересекающихся под углом $2\varepsilon = \pi/2 - \rho$, кривых линий. Главное напряжение σ_1 в произвольной точке составляет с каждой из проходящих через эту точку линий скольжения угол $\pm\varepsilon$ [4, 14].

Несмотря на относительно простой вид преобразованных дифференциальных уравнений, их интегрирование в замкнутом виде возможно лишь в некоторых частных случаях. В общем случае решение может быть получено только численным методом путём замены дифференциальных уравнений рекуррентными конечно-разностными выражениями. В зависимости от условий на границах вычислительная процедура сводится к последовательному решению трёх краевых задач механики предельного равновесия сыпучих сред для ряда характерных участков предельно напряжённой зоны [14, 9–11].

Первая краевая задача формулируется следующим образом [14]. На границе участка заданы координаты точек y, z , приведённое напряжение σ и угол φ . По рекуррентным соотношениям путём конечно-разностной процедуры решения нелинейных уравнений определяются направления линий скольжения и приведённые напряжения во всех её точках, которыми являются узловые точки пересечения двух систем этих линий.

Во второй краевой задаче граничные условия заданы на двух границах участка. В этом случае расчёт заключается в построении линий скольжения и вычислении напряжений и угла наклона напряжения σ_1 в узлах сетки этих линий. Он производится по тем же рекуррентным соотношениям, что и в решении первой краевой задачи.

В третьей краевой задаче на одной границе участка заданы все основные параметры (y, z, σ, φ), принадлежащие одной системе линий скольжения, а на другой его границе известны два конечных или дифференциальных соотношения между y, z, σ, φ , принадлежащие

другой системе линий скольжения. Построение сетки линий скольжения и вычисление приведённых напряжений во внутренних точках участка производится с помощью тех же рекуррентных соотношений, что и в предыдущих двух задачах.

Приведённое напряжение σ и угол θ , образованный контактом пласта (поверхностью ослабления) с линией скольжения одной системы и определяющий угол φ , выражаются через компоненты напряжений и характеристики прочности пласта соотношениями, вытекающие из построений на круге Мора, следующим образом [4, 14, 15].

$$\sigma = C + \frac{\sigma_y + \sigma_z}{2} = C + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2},$$

$$\theta = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}(\rho - \rho') - \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{\sin \rho'}{\sin \rho} \left(1 - \frac{C - C'}{\sigma} \right) \right],$$

где σ_y, σ_z — нормальные напряжения, а σ_1, σ_3 — главные напряжения в предельно напряжённой зоне пласта, C и C' — временные сопротивления всестороннему равномерному растяжению самого пласта и на его контакте с массивом [14]. Они также определяются через коэффициенты сцепления K, K' с помощью круга Мора следующими выражениями [4, 14, 15]:

$$C = K \operatorname{ctg} \rho, \quad C' = K' \operatorname{ctg} \rho',$$

в которых параметры K и K' связаны с σ_0 и σ'_0 также известными соотношениями [4, 14]:

$$K = \frac{(1 - \sin \rho)}{2 \cos \rho} \cdot \sigma_0, \quad K' = \frac{(1 - \sin \rho')}{2 \cos \rho'} \cdot \sigma'_0,$$

а σ_1, σ_3 и $\sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}$ выражаются через приведённые напряжения и параметры прочности пласта следующими зависимостями [4, 14]:

$$\sigma_1 = \sigma(1 + \sin \rho) - C, \quad \sigma_3 = \sigma(1 - \sin \rho) - C.$$

$$\sigma_y = \sigma(1 + \sin \rho \cdot \cos 2\varphi) - C,$$

$$\sigma_z = \sigma(1 - \sin \rho \cdot \cos 2\varphi) - C,$$

$$\tau_{yz} = \sigma \cdot \sin \rho \cdot \sin 2\varphi - C.$$

На рис. 2 показана схема очистной выработки и предельно напряжённая зона пласта с линиями скольжения в ней. На нём треугольный участок ABA_1 , примыкающий к обнажению пласта, называется участком выпирания. Распределение напряжений и линий скольжения в нём может быть получено в рамках решения первой краевой задачи. На стороне AA_1 (рис. 2) известно, что $\sigma_y = \sigma_3 = 0$, $\sigma_z = \sigma_1 = \sigma_0$, а угол $\varphi = 90^\circ$. Отсюда следует, что

$$\varepsilon = \frac{\pi}{4} - \frac{\rho}{2}, \quad \sigma = \frac{C}{1 - \sin \rho}, \quad (3)$$

а сетка линий скольжения представляет собой две системы изогональных прямых линий. Напряжённое состояние на этом участке представлено нормальными вертикальными напряжениями σ_1 .

Если на кромку пласта AA_1 действует равномерно распределённая горизонтальная нагрузка p , значение которой меньше σ_0 , то

первая формула (3) остаётся без изменений, а вторая формула для приведённых напряжений примет следующий вид

$$\sigma = \frac{C + p}{1 - \sin \rho}. \quad (4)$$

На участках AET и $A_1E_1T_1$ (рис. 2) напряжённое состояние также однородное. Здесь в равной степени реализуются как общий, так и специальный критерий Кулона–Мора. Сетка линий скольжения представляет собой две изогональные системы прямых линий.

Между участком выпирания и участками AET , $A_1E_1T_1$ в общем случае возникают два треугольных так называемых участка Прандтля $ABE_1T_1V_1WE$ и $A_1BET_1V_1WE_1$ с углом раствора $\Delta\varphi$, который определяется непосредственно из рис. 2

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2} - \theta - \varepsilon = \frac{\pi}{4} + \frac{\rho}{2} - \theta.$$

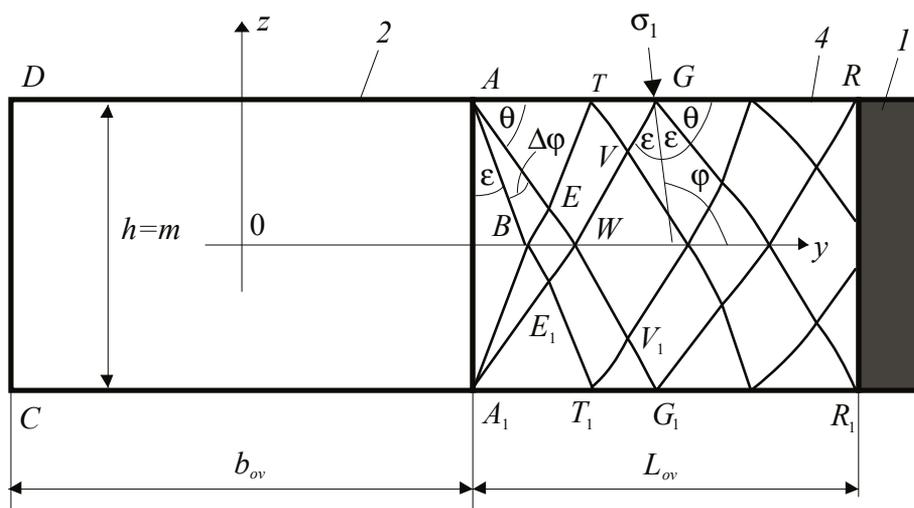


Рис. 2. Схема выработки и предельно напряжённой зоны в угольном пласте.
1 — угольный пласт, 2 — очистная выработка, 4 — предельно напряжённая зона пласта со схемой линий скольжения

Задача о расчёте напряжений в зоне Прандтля относится ко второй краевой задаче предельного состояния среды, и её решение замкнутое. Одна система линий скольжения — это пучок прямых линий, выходящих из точек A и A_1 , а другой системой линий скольжения являют логарифмические спира-

ли. Напряжения вдоль прямых линий скольжения постоянны, вдоль логарифмических спиралей они изменяются экспоненциально [4, 14].

Для участков TVG и $T_1V_1G_1$ предельно напряжённой зоны расчёт может быть проведён лишь численно в рамках третьей краевой за-

дачи. Расчёт напряжений для всех остальных участков, расположенных правее линий WVG и $W_1V_1G_1$, также может быть получен в рамках третьей краевой задачи только численным путём.

Для дальнейших исследований напряжённого состояния массива горных пород эпюры напряжений вдоль контактов пласта с окружающим массивом следует аппроксимировать аналитическими зависимостями, например, полиномами или экспонентой, содержащими неопределённые коэффициенты. Такая замена упрощает приведение упругопластической задачи к краевой задаче теории упругости.

Коэффициенты полинома определяются из решения системы алгебраических уравнений, число которых совпадает с количеством участков в предельно напряжённой зоне пласта (слоя). Правые части уравнений этой системы равны значениям найденных напряжений на границах участков этой зоны [16].

При аппроксимации эпюры напряжений экспонентой её неизвестные параметры определяются из условия равенства ординат аппроксимируемой эпюры напряжений и аппроксимирующей экспоненты в ряде точек на контакте слоя с массивом.

Как показывают сравнительные оценки эпюр напряжений, построенных методом характеристик и графиков напряжений, построенных с помощью экспоненты, достаточно точную аппроксимацию обеспечивает экспоненциальная формула Г.Л. Фисенко [4]:

$$\sigma_q = \frac{\sigma_0}{2\sin\rho} \cdot e^{k \cdot \left(y - \frac{b_v}{2}\right)}, \quad (5)$$

$$\text{где } k = \frac{\eta}{h_v} \cdot \frac{1 + \sin\rho}{1 - \sin\rho} \cdot \operatorname{tg}\rho',$$

где неизвестный коэффициент η определяется из того условия, что ординаты экспоненты совпадают с заданной точностью с ординатами построенной методом характеристик эпюрой напряжений σ_q , а b_v – пролёт (ширина) выработки.

В своих расчётах Г.Л. Фисенко принимал коэффициент η , равным двум. При таком значении удовлетворительная аппроксимация

достигается лишь при сравнительно малых значениях аргумента $y - b_v/2$, а с его увеличением разница в значениях ординат графиков возрастает на расстоянии $4,44 h_v$ до 85 % [16].

2.2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ О МАССИВЕ С ПЛАСТОВОЙ ВЫРАБОТКОЙ

Зная характер распределения линий скольжения и напряжений, можно определить напряжения в любой точке предельно напряжённой зоны пласта, в том числе и на его контакте с массивом. В этой связи замена предельно напряжённой зоны пласта, действующими на контакте пласта нормальными и касательными напряжениями позволяет сформулированную задачу свести к краевой задаче теории упругости [9–11]. В этой задаче граничные условия формулируются не по контуру выработки, а по замкнутому контуру, включающему кровлю, почву выработки и контакт пласта на участке предельной зоны. Тогда в граничном интегральном сингулярном уравнении краевой задачи теории упругости [17, 18] интегрирование производится по замкнутому контуру, охватывающему кровлю, почву выработки и контур предельно напряжённой зоны.

В этом интегральном уравнении кроме неизвестной фиктивной нагрузки неизвестным остаётся также и суммарный размер предельно напряжённых зон, входящий в область интегрирования L . Они находятся в ходе реализации итерационной процедуры метода последовательных приближений, реализованной в [9–11]. Сначала этот размер задаётся, затем решается интегральное уравнение, а после этого вычисляются напряжения вдоль контакта пласта с массивом (вдоль линии $ARBМ$ на рис. 1). Далее, на границе упругой области и предельно напряжённой зоны сравниваются проекции p_y, p_z на оси y, z полного напряжения. Если результаты отличаются друг от друга, то решение интегрального уравнения производится при другом значении L . Процедура счёта продолжается до тех пор, пока значения полных напряжений на грани-

це упругой области и предельно напряжённой зоны не совпадут или будут достаточно близко друг к другу. После этого считается, что поле напряжений построено.

Описанный метод граничных интегральных уравнений применялся к построению поля напряжений для оценки геомеханического состояния упругого анизотропного массива с системой выработок как в двумерной постановке [19–23], так и в трёхмерной [24].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ И ИХ АНАЛИЗ

Ниже приведены результаты расчёта параметров опорного давления в окрестности очистной и подготовительной выработок. В качестве исходной информации приняты следующие параметры массива и пласта: $H = 800$ м, $\gamma = 25$ кН/м³, $\gamma_s = 20$ кН/м³, $\lambda = 1$, $\sigma_0 = 10$ МПа, $\rho = 20^\circ$, $\psi = 50^\circ$, $h = m = 3$ м, $b_{ov} = 10$ м, $b_{nv} = 5$

м, $c = 30$ м, $k_p = 1,2$, $\sigma'_0 = 0$, $\rho' = 10^\circ$, $\sigma_s = \sigma'_s = 0$, $\rho_s = \rho'_s = 25^\circ$.

Из формулы (1) следует, что $h_0 = 15$ м, а из рисунка 1 $L_C = (15-3) \cdot \text{ctg}50^\circ = 10,07$ м.

При расчёте величины σ по формуле (4) вместо угла ρ следует брать значение угла ρ_s , а параметр C заменить на C_s . Поскольку $\sigma_s = \sigma'_s = 0$, а $\rho'_s = \rho_s$, то величина $C_s = 0$, а $\sigma = p/(1-\sin\rho_s)$. В этой связи в предельно напряжённой зоне пласта отсутствуют участки, в которых реализуются специальный критерий Кулона–Мора и, следовательно, зоны Прандтля полностью заполняют эти участки.

На рис. 3, 4 представлены результаты компьютерного моделирования сеток линий скольжения в предельно напряжённых зонах угольного пласта и слоя обрушенных пород, полученных по результатам численного решения трёх краевых задач для ряда характерных участков этих зон.

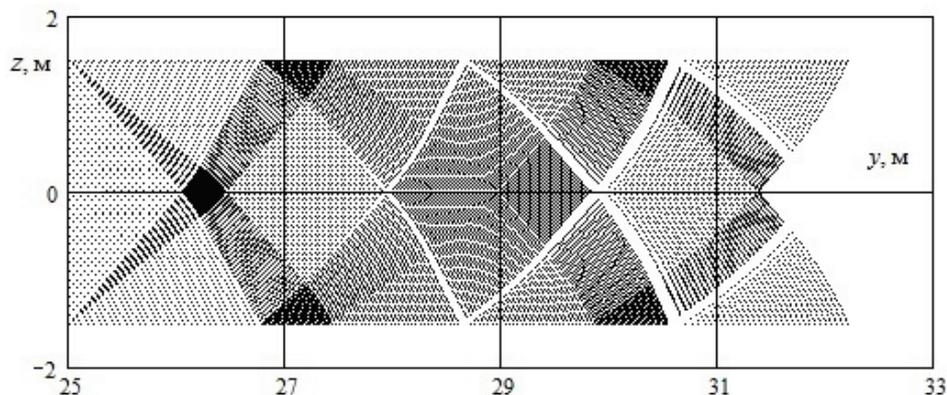


Рис. 3. Компьютерная модель линий скольжения в предельно напряжённой зоне угольного пласта

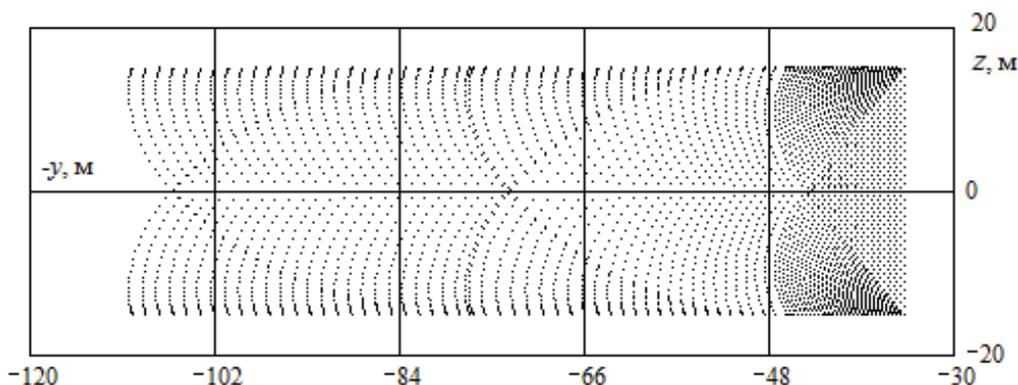


Рис. 4. Компьютерная модель линий скольжения в предельно напряжённом слое обрушенных пород

На рис. 5 представлена эпюра напряжений σ_z (опорного давления), полученная по результатам решения упругопластической задачи. Она построена вдоль кровли целика по линии *ARBM*. Линии, обозначенные цифрой 1, соответствуют эпюрам напряжений в пре-

дельно напряжённых зонах пласта очистной и подготовительной выработок. При решении задачи эти эпюры аппроксимированы полиномом восьмой степени. Кривая, обозначенная цифрой 2, — эпюра напряжений в упругой части целика.

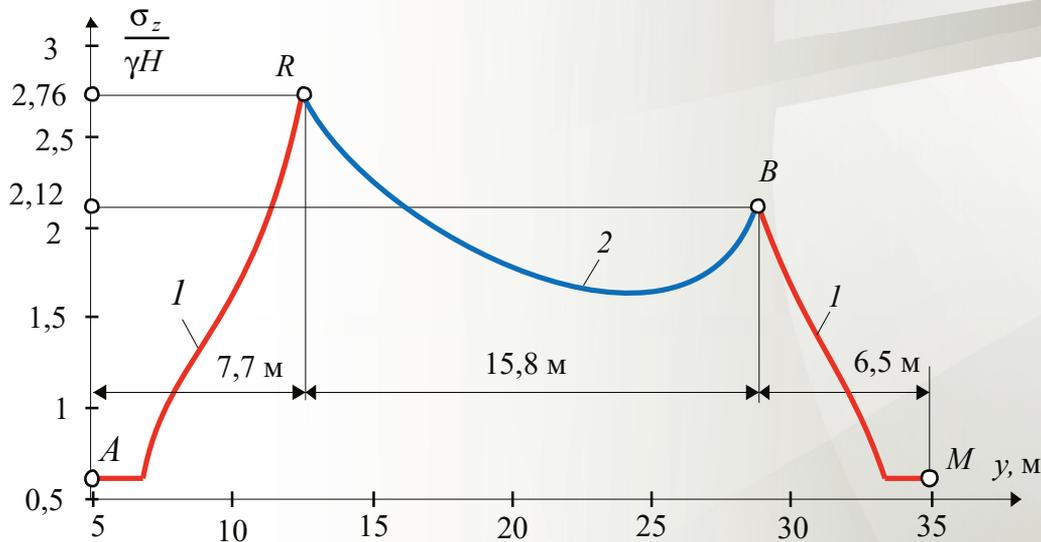


Рис. 5. Эпюра напряжений σ_z в кровле целика между выработками

Из рисунка следует, что коэффициент концентрации напряжений k_σ в окрестности очистной выработки получился равным 2,76 единицы, а размер предельно напряжённой зоны L_{ov} равен 7,7 м. В окрестности подготовительной выработки эти параметры, соответственно, равны $k_\sigma = 2,12$, $L_{mv} = 6,5$ м.

На рис. 6 представлена эпюра напряжений σ_z , построенная по результатам решения упруго пластической задачи вдоль границы слоя обрушенных пород с массивом по линии *QKF* позади очистной выработки. Цифры на рисунке обозначают те же параметры, что и на рисунке 2. При решении задачи эпюра напряжений 1 была аппроксимирована экспонентой в форме (5). Коэффициент η принят равным 1,507 единицы. По результатам расчётов параметры опорного давления получились равными $k_\sigma = 2,09$, $L_o = 46$ м.

Из сравнения параметров опорного давления следует, что коэффициент концентрации напряжений в краевой зоне обрушенных пород близок к коэффициенту концентрации

напряжений в борту подготовительной выработки. В то же время длина предельно напряжённой зоны позади неё в 7,08 раза превышает размер предельно напряжённой зоны пласта около этой выработки и в 5,97 раза размер этой зоны в борту очистной выработки.

Проведены также расчёты параметров опорного давления при других значениях угла внутреннего трения ρ_s слоя обрушенных пород. Для всех осадочных горных пород он меняется в интервале от 20° до 39° [25]. Как показывают результаты расчётов, изменение величина угла ρ_s на всём диапазоне его возможных значений незначительно сказывается на параметрах опорного давления в предельно напряжённой зоне пласта, но оно оказывает существенное влияние на лишь размер предельно напряжённой зоны слоя обрушенных пород. Таким образом, значение ρ_s не играет существенной роли в расчётах, а, следовательно, и в технологических операциях при ведении очистных работ.

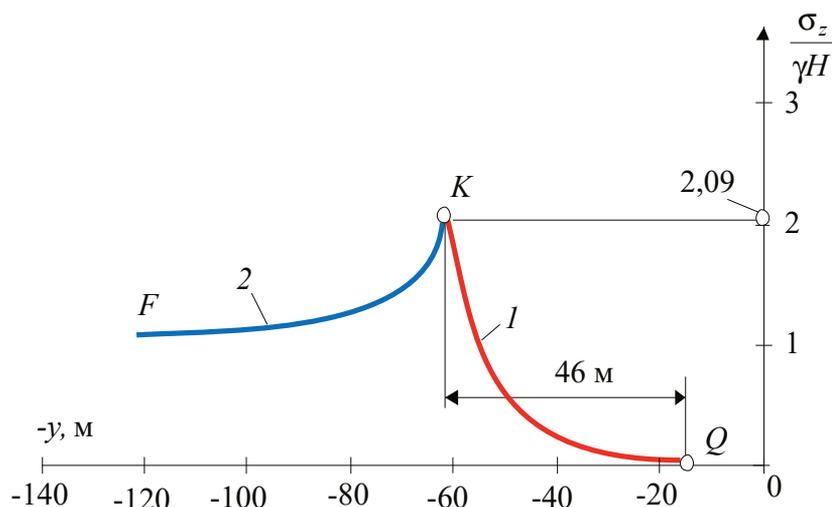


Рис. 6. Эпюра напряжений σ_z в кровле слоя обрушенных пород

На рисунке 7 представлены графические результаты расчёта параметров опорного давления в окрестности очистной и подготовительной выработок, полученные для ряда значений пролёта очистной выработки при фиксированном значении целика между выработками, равного 30 м.

На рисунке 7 а построены графики зависимости коэффициента концентрации напряжений в краевой части пласта впереди очистной (кривая 1), в борту подготовительной (кривая 2) выработок при изменении пролёта очистной выработки. Графики имеют вид пологих монотонно возрастающих кривых, при этом, интенсивность роста коэффициента около очистной выработки выше, чем в борту подготовительной. Из графиков следует, что с

увеличением пролёта очистной выработки в пять раз, коэффициент концентрации около неё увеличивается только в 1,28 раза, т. е. на 28 %, а в окрестности подготовительной он возрастает в 1,23 раза — на 23 %.

На рисунке 7 б построены графики зависимости размера предельно напряжённой зоны пласта около очистной выработки (кривая 1) и в борту подготовительной выработки (кривая 2) при увеличении пролёта очистной выработки. Эти графики также как и на рис. 7 а имеют вид слабо выпуклых пологих возрастающих кривых, причём интенсивность роста этих кривых одинакова. Увеличение пролёта очистной выработки в пять раз увеличивает предельно напряжённые зоны около обеих выработок всего лишь на 15,6 %.

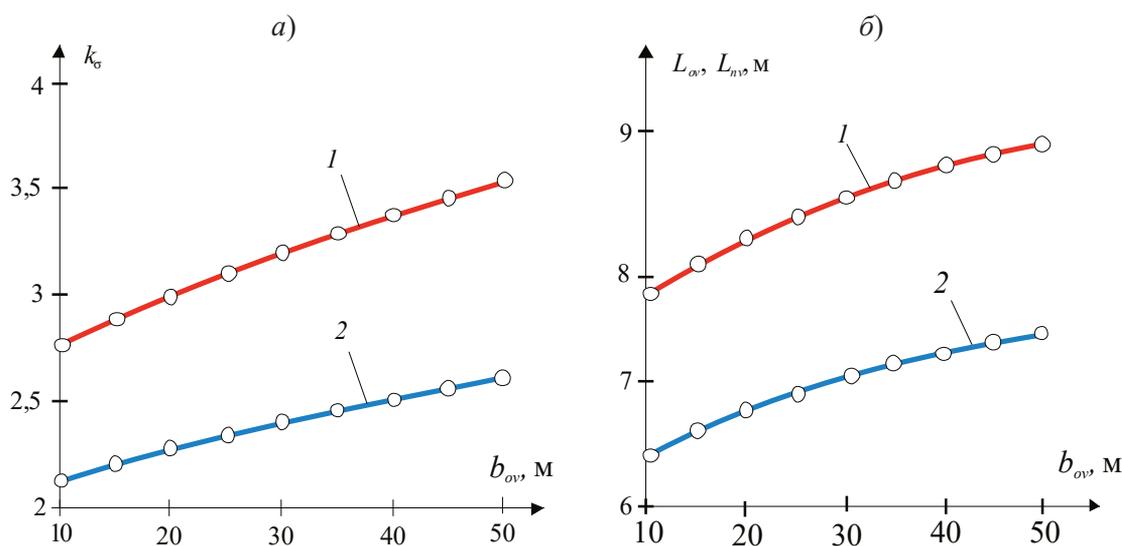


Рис. 7. Графики зависимости параметров опорного давления около выработок от пролёта очистной выработки

Заключение. Разработанная модель геомеханического состояния массива горных пород, вмещающего угольных пластов, пройденные по нему две выработки и слой обрушенных пород, обеспечивает проведение всесторонних исследований напряжённого состояния этого массива, допускает детальный анализ и даёт вполне надёжные прогнозные оценки его геомеханического состояния.

4. ВЫВОДЫ

1. Задача о напряжённом состоянии массива в окрестности системы очистной и подготовительной выработок относится к классу упругопластических задач. Эта задача корректно сводится ко второй внешней краевой задаче теории упругости. В свою очередь за-

дача теории упругости реализуется методом граничных интегральных уравнений.

2. Параметры опорного давления в угольном целике между очистной и подготовительной выработками при изменении пролёта очистной выработки и неизменном размере целика меняются незначительно. Коэффициент концентрации напряжений около очистной выработки при увеличении её пролёта в пять раз увеличивается всего на 28 %, а размер предельно напряжённой зоны возрастает ещё меньше — на 15,6 %.

3. Изменение угла внутреннего трения слоя обрушенных пород позади очистной выработки оказывает влияние лишь на размер предельно напряжённой зоны в этом слое и незначительно изменяет максимум опорного давления в краевых частях пласта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. М.: Недра, 1983. 280 с.
2. Чернов О.И., Пузырев В.Н. Прогноз внезапных выбросов угля и газа. М.: Недра, 1979. 296 с.
3. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. М.: Недра, 1980. 360 с.
4. Фисенко Г.Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. М.: Недра, 1976. 272 с.
5. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. М.: Недра, 1989. 488 с.
6. Шинкевич М.В., Козырева Е.Н., Плаксин М.С. и др. Методические основы прогноза динамики метанообильности выемочного участка при отработке мощных и сближенных пластов длинными столбами // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2017. № 3. С. 23–29.
7. Черданцев Н.В., Черданцев С.В., Ли Хи Ун и др. Об одном подходе к описанию суффляжных выделений газа из резервуаров угольного массива в горные выработки // Безопасность труда в промышленности. 2017. № 3. С. 23–29.
8. Петухов И.М., Линьков А.М., Сидоров В.С., Фельдман И.А. Теория защитных пластов. М.: Недра, 1976. 223 с.
9. Черданцев Н.В., Черданцев С.В. Разработка модели геомеханического состояния массива, вмещающего пластовую выработку и геологическое нарушение, и её применение в расчёте напряжённого состояния среды // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. 2018. № 3. С. 24–37.
10. Черданцев Н.В., Черданцев С.В. Анализ состояния угленосного массива, вмещающего пластовую выработку и геологическое нарушение // Механика твёрдого тела. 2018. № 2. С. 110–121.
11. Черданцев Н.В. Один из подходов к построению траектории трещины гидроразрыва в массиве горных пород вблизи горной выработки // Прикладная математика и механика. 2020. № 2. С. 208–233.
12. Христианович С.А. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1981. 484 с.

13. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с.
14. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М.: Наука, 1990. 272 с.
15. Руппенейт К.В. Некоторые вопросы механики горных пород. М.: Углетехиздат, 1954. 384 с.
16. Черданцев Н.В. Результаты численного решения уравнений предельного состояния краевой зоны пласта и их аппроксимация полиномами // Безопасность труда в промышленности. 2019. № 6. С. 7–13.
17. Лурье А.И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. 940 с.
18. Партон В.З., Перлин П.И. Методы математической теории упругости. М.: Наука, 1981. 688 с.
19. Черданцев Н.В., Шаламанов В.А. Граничные интегральные уравнения в задачах механики подземных сооружений // Известия вузов «Горный журнал». 2004. № 5. С. 50–54.
20. Черданцев Н.В., Преслер В.Т., Ануфриев В.Е. Вопросы методического и инструментального обеспечения мониторинга горных выработок. Кемерово: ИУ СО РАН, 2012. 222 с.
21. Черданцев Н.В. Зоны нарушения сплошности в области сопряжения двух выработок квадратного поперечного сечения // Вестник КузГТУ. 2003. № 5. С. 19–21.
22. Черданцев Н.В., Преслер В.Т., Изаксон В.Ю. Классификация вырезов по степени их влияния на окружающий массив // Вестник КузГТУ. 2006. № 5. С. 3–7.
23. Черданцев Н.В. Влияние анкерной крепи на устойчивость породного массива, вмещающего одиночную выработку // Вестник КузГТУ. 2012. № 4. С. 3–7.
24. Черданцев Н.В., Преслер В.Т., Изаксон В.Ю. Геомеханическое состояние анизотропного по прочности массива горных пород в окрестности сопрягающихся выработок // ФТПРПИ. 2010. № 2. С. 62–68.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2020.56.52.004

UDC 622.023.23

© N.V. Cherdantsev, 2020

N.V. CHERDANTSEV

Doctor of Engineering Sciences,

Chief Researcher

Federal Research Center For Coal And Coal Chemistry, Kemerovo

e-mail: nvch2014@yandex.ru

CONSTRUCTION OF PROBLEM SOLUTION ON STRESSED STATE OF MINED COAL SEAM NEAR TWO WORKINGS

The stress field in the carbon mass containing the formation workings and the developed space is built as a result of solving the elastoplastic problem, in which the area of plasticity is the extremely stressed zones of the edge parts of the formation, as well as the area of the layer of collapsed rocks behind the treatment workings. In the edge parts, this field is determined during the numerical solution of three edge problems of the limit state of the formation and the layer of collapsed rocks. The criteria for the onset of the limit state are the general Coulomb-Mor criterion for the coal bed and the layer of collapsed rocks, as well as a special criterion for the limit state for their contacts with the massif.

By replacing the extremely stressed zones with stresses acting on the contact of the formation with the mass, the elastoplastic problem is reduced to the second external boundary problem of the theory of elasticity, which is solved by the method of boundary integral equations.

Reference pressure epures were built in the edge parts of the formation and the layer of collapsed rocks. It was found from the analysis of the results of the studies that significant changes in the angle of internal friction of the collapsed rocks have little effect on the parameters of the reference pressure in the vicinity of the treatment and preparatory workings.

Keywords: ROCK MASS, COAL BED, STRATUM ULTIMATE STRENGTH, ADHESION COEFFICIENT, INTERNAL FRICTION ANGLE, EXTREMELY STRESSED ZONES, COULOMB-MOR LIMIT STATE CRITERIA, MINING.

REFERENCES

1. Petukhov I.M., Linkov A.M. the Mechanics of rock bursts and emissions. M.: Nedra, 1983. 280 p. [In Russ.].
2. Chernov O.I., Puzyrev V.N. The forecast of sudden outbursts of coal and gas. M.: Nedra, 1979. 296 p. [In Russ.].
3. Borisov A.A. Mechanics of rock and arrays. M.: Nedra, 1980. 360 p. [In Russ.].
4. Fisenko G.L. For the Limit state of rocks around an excavation. M.: Nedra, 1976. 272 p. [In Russ.].
5. Turchaninov I.A., Iofis M.A., Kasparian E.V. Fundamentals of rock mechanics. M.: Nedra, 1989. 488 p. [In Russ.].
6. Shinkevich M.V., Kozyrev E.N., Plaksin M.S. and et. Methodical bases of forecasting of the dynamics of metroblity extraction coal plot when developing powerful and contiguous layers of long columns // Bulletin of the Research center for work safety in the coal industry [Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti]. 2017. No. 3. P. 23–29. [In Russ.].
7. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V., Li Hee UN and others On one approach to describing the vented gas emissions from coal reservoirs in mining operations // Labor Safety in Industry [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2017. No. 3. P. 23–29. [In Russ.].
8. Petukhov I.M., Linkov A.M., Sidorov V.S., Feldman I.A. Theory of Protective Layers. M.: Nedra, 1976. 223 p. [In Russ.].
9. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V. Development of a model of the geomechanical state of the massif containing a reservoir development and geological disturbance, and its application in calculating the stress state of the environment // Bulletin of the Scientific center of the VostNII for industrial and environmental safety [Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoy i ekologicheskoy bezopasnosti]. 2018. No. 3. P. 24–37. [In Russ.].
10. Cherdantsev N.V. Cherdantsev S.V. Analysis of the state for a coal massif in-seam working and a geological discontinuity // Mechanics of Solids [Mekhanika tvordogo tela]. 2018. Vol. 53. No. 2. P. 211–220. [In Russ.].
11. Cherdantsev N.V. One of the approaches to constructing the trajectory of a hydraulic fracture in a rock mass near a mine workings // Applied mathematics and mechanics [Prikladnaya matematika i mekhanika]. 2020. No. 2. P. 208–233. [In Russ.].
12. Khristianovich S.A. Continuum Mechanics. M.: Nauka, 1981. 484 p. [In Russ.].
13. Kachanov L.M. Fundamentals of plasticity theory. M.: Nauka, 1969. 420 p. [In Russ.].
14. Sokolovsky V.V. Loose Medium Statics. M.: Nauka, 1990. 272 p. [In Russ.].
15. Ruppeneyt K.V. Some Questions of Rock Mechanics, M.: House of Coal, 1954. 384 p. [In Russ.].
16. Cherdantsev N.V. Results of numerical solution of equations of the marginal state of the boundary zone of the formation and their approximation by polynomials // Labor Safety in Industry [Bezopasnost truda v promyshlennosti]. 2019. No. 6. P. 7–13. [In Russ.].
17. Lurie A. I. Theory of elasticity. M.: Nauka, 1970. 940 p. [In Russ.].
18. Parton V.Z., Perlin P.I. Methods of mathematical theory of elasticity. M.: Nauka, 1981. 688 p. [In Russ.].

19. Cherdantsev N.V., Shalamanov V.A. Boundary integral equations in problems of mechanics of underground structures // Bulletin of universities «Gorny Zhurnal» [Izvestiya vuzov «Gornyy zhurnal»]. 2004. No. 5. P. 50–54. [In Russ.].

20. Cherdantsev N.V., Presler V.T., Anufriev V.E. Questions of methodological and instrumental support for monitoring of mine workings. Kemerovo: IU SB RAS, 2012. 222 p. [In Russ.].

21. Cherdantsev N.V. Zones of discontinuity in the area of conjugation of two square cross-section lines // Bulletin of KuzSTU [Vestnik KuzGTU]. 2003. No 5. P. 19–21. [In Russ.].

22. Cherdantsev N.V., Presler V.T., Izakson V.Yu. Classification of cutouts by the degree of their influence on the surrounding array // Bulletin of KuzSTU [Vestnik KuzGTU]. 2006. No. 5. P. 3–7. [In Russ.].

23. Cherdantsev N. V. Influence of anchor support on the stability of rock mass containing a single mine working // Bulletin of KuzSTU [Vestnik KuzGTU]. 2012. No. 4. P. 3–7. [In Russ.].

24. Cherdantsev N.V., Presler V.T., Izakson V.Yu. Geomechanical state of a strength anisotropic rock mass in the vicinity of mating tunnels // Journal of Mining Science [FTPRPI]. 2010. Vol. 46. No. 2. P. 143–148. [In Russ.].